

(19) 日本国特許庁 (J P)

## (12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2001-281480

(P2001-281480A)

(43) 公開日 平成13年10月10日 (2001. 10. 10)

(51) Int.Cl.<sup>7</sup>

識別記号

F I

テームド (参考)

G 0 2 B 6/122  
6/12

G 0 2 B 6/12

A 2 H 0 4 7

D

N

Z

審査請求 有 請求項の数10 O L (全 8 頁)

(21) 出願番号 特願2000-91781 (P2000-91781)

(22) 出願日 平成12年3月29日 (2000. 3. 29)

(71) 出願人 000004237

日本電気株式会社

東京都港区芝五丁目7番1号

(72) 発明者 山田 博仁

東京都港区芝五丁目7番1号 日本電気株式会社内

(74) 代理人 100065385

弁理士 山下 稔平

Fターム (参考) 2H047 KA04 KA05 KB04 QA02 QA04

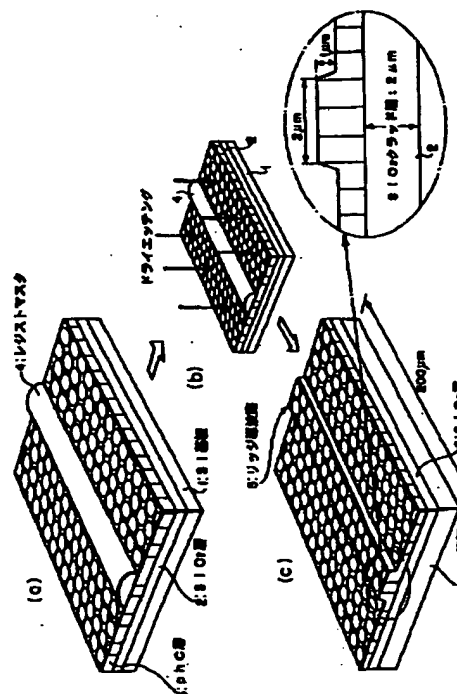
QA05 TA33 TA34 TA43

(54) 【発明の名称】 フォトニック結晶光導波路と方向性結合器

## (57) 【要約】

【課題】 外部光学系との結合効率の良好かつ作製容易な新しいフォトニック結晶光導波路の形態を提供し、それらフォトニック結晶光導波路のデバイスとしての応用方法を提供する。

【解決手段】 光の波長程度の大きさで、屈折率が2次元或いは3次元周期的に変調された構造体としてのフォトニック結晶光導波路において、前記フォトニック結晶をその屈折率が前記フォトニック結晶の平均的な屈折率よりも小さい材料 (クラッド) で挟み込むことにより、フォトニック結晶部分をコアとするスラブ導波路型のフォトニック結晶構造を有し、前記スラブ導波路型フォトニック結晶のコア層部分の一部の厚さを他の部分よりも若干厚くすることにより屈折率ガイド効果を持たせ、このコアの層厚の厚い部分を導波路として光を導くことを特徴とする。



## 【特許請求の範囲】

【請求項1】 光学材料中に光の波長程度の大きさの孔を設け、屈折率が2次元或いは3次元周期的に繰り返された構造体としてのフォトニック結晶を用いたフォトニック結晶光導波路において、

前記フォトニック結晶をその屈折率が前記フォトニック結晶の平均的な屈折率よりも小さい材料（クラッド）で挟み込むことにより、前記フォトニック結晶部分をコアとするスラブ導波路型のフォトニック結晶構造を有し、前記スラブ導波路型フォトニック結晶のコア層部分の一部の厚さを他の部分よりも若干厚くすることにより屈折率ガイド効果を持たせ、このコアの層厚の厚い部分を光導波路として光を導くことを特徴とするフォトニック結晶光導波路。

【請求項2】 請求項1に記載のフォトニック結晶光導波路において、前記コア層部分を成すフォトニック結晶層の厚さは均一のままにして、前記コア部分の一部にその屈折率がクラッド部分よりも大きい材料を貼り付けることにより前記屈折率ガイド効果を持たせ、前記屈折率がクラッド部分よりも大きい材料を貼り付けた部分を光導波路として光を導くことを特徴とするフォトニック結晶光導波路。

【請求項3】 請求項2に記載のフォトニック結晶光導波路において、前記コア層の一部に前記屈折率がクラッド部分よりも大きい材料としては、PMMA系レジスト或いは $\text{SiO}_2$ を用いることを特徴とするフォトニック結晶光導波路。

【請求項4】 請求項1又は、2、3に記載のフォトニック結晶光導波路において、前記コア層を挟み込むクラッド層の内どちらか一方が空気であることを特徴とするフォトニック結晶光導波路。

【請求項5】 請求項1乃至4のいずれかに記載のフォトニック結晶光導波路において、前記光導波路を導波させる光波の波長が前記フォトニック結晶のフォトニックバンドギャップの外に有るか分散性の強い前記フォトニックバンドギャップの近傍を用いることを特徴とするフォトニック結晶光導波路。

【請求項6】 請求項5に記載のフォトニック結晶光導波路において、前記フォトニックバンドギャップ端付近の強い分散を用いることにより、前記光導波路を伝搬させる光波或いは光パルスの遅延動作、又は、圧縮動作、分散補償動作を行わせることを特徴とするフォトニック結晶光導波路。

【請求項7】 光学材料中に光の波長程度の大きさの孔を2次元或いは3次元周期的に開けることにより、屈折率が2次元或いは3次元周期的に繰り返えされた構造体としてのフォトニック結晶を用いたフォトニック結晶光導波路において、

前記フォトニック結晶をその屈折率が前記フォトニック結晶の平均的な屈折率よりも小さい材料（クラッド）で

挟み込むことにより、前記フォトニック結晶部分をコアとするスラブ導波路型のフォトニック結晶構造を有し、前記フォトニック結晶の一部の孔を屈折率が1よりも大きい材質で満たすことにより当該屈折率が1よりも大きい材質で満たす部分に光を局在させ、前記屈折率が1よりも大きい材質の材料で満たされた部分を光導波路として光を導くことを特徴とするフォトニック結晶光導波路。

【請求項8】 請求項7に記載のフォトニック結晶光導波路において、前記屈折率が1よりも大きい材質の材料としてはPMMA系レジストを用いることを特徴とするフォトニック結晶光導波路。

【請求項9】 請求項8に記載のフォトニック結晶光導波路において、前記孔を満たす材料として、前記コアとしての前記フォトニック結晶を構成する物質の温度係数と符号が逆の性質を有する物質を用いることにより、特性の温度変化を小さくすることを特徴とするフォトニック結晶光導波路。

【請求項10】 請求項5又は7、8のいずれかに記載のフォトニック結晶光導波路上の前記光導波路の2本を接近させることにより一方の前記導波路の光波の一部を他方の前記導波路に得ることを特徴とする方向性結合器。

## 【発明の詳細な説明】

## 【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、フォトニック結晶光導波路に関し、例えば、光通信システムや光交換システムあるいは光計測システムの分野に、光波長を透過或いは阻止する光フィルタ、光合波分波器、光分散補償デバイス等に用いられ、特に光通信用のフォトニック結晶微小光回路を構成するフォトニック結晶光導波路及びそれを用いた方向性結合器に関する。

## 【0002】

【従来の技術】近年、光の波長オーダーでの屈折率の3次元周期構造体としてのフォトニック結晶が注目されている。このフォトニック結晶は、既存の光回路の大きさを3桁以上も小さくできる可能性を秘めており、光通信を始めとする微小光回路への適用が期待されている。このフォトニック結晶中に形成する微小光回路の光導波路の構造は、従来様々な形態のものが提案されている。

【0003】図7は従来のフォトニック結晶中の光導波路の一形態を表す図である。この光導波路は、伝搬させる光波の波長に対して、完全バンドギャップを有するフォトニック結晶中に、線欠陥構造を導入することにより、この線欠陥部分を光導波路として用いるものである。このような線欠陥光導波路の特徴としては、光の閉じ込めが強いために急峻な曲がりにも対応でき、光回路パターン自由度を大きくでき、さらにその大きさを小さくできるという特徴がある。

【0004】図7の構造においては、12のコア層として

いる部分がSi等の屈折率の高い材料から成り、11及び13の下部及び上部クラッド層と呼んでいる部分がSiO<sub>2</sub>等の屈折率の低い材料から成っている。このような屈折率の異なる2種類の材料による三次元周期構造体では、ある波長域の光に対して、光の伝搬が禁止されるフォトニックバンドギャップが形成されることが知られている。従って、このフォトニックバンドギャップを有するフォトニック結晶中で発生した光は、外部に出ることは出来ない。ところが、この3次元的に光の伝搬できない完全バンドギャップを有するフォトニック結晶中に、ある種の結晶欠陥、たとえば線状の線欠陥を導入すると、光がその線欠陥に沿って伝搬できるようになる。これがフォトニック結晶による線欠陥導波路と呼ばれる所以である。図7の構造においては、上下に劈開した構成としているのは、この線欠陥導波路の内部を表現するためであり、現実にはこの劈開はなく、10に示す光が入射する部分の結晶格子が、線状に欠けており、この部分が光導波路として機能する。

【0005】また、第2の従来技術として、特開平11-218627号公報には、フォトニック結晶導波路の特性の安定化と製造コストを削減するべく、シリコン基板の表面に誘電体スラブ光導波路を有すると共にスラブ導波路の一部にスラブ光導波路のコア層の屈折率と異なる屈折率を有する屈折率変化領域が格子配列状に配置されたフォトニック結晶構造が設けられたフォトニック結晶導波路であって、前記屈折率変化領域は前記スラブ光導波路のコア層を構成する材質と同じ材質でかつ光誘起効果による屈折率変化処理が施された材質で構成されていることが記載されている。

【0006】また、同公報には、フォトニック結晶導波路の製造方法として、気相成長(MO-CVD)法或いは液相成長(LPE)法などによって、基板上に下部クラッド層、コア層、上部クラッド層からなるスラブ光導波路を作製した後、電子線、SOR(Synchrotron Orbital Radiation)光、紫外線および近赤外線の中のいずれかを前記上部クラッド層を通して前記コア層に選択的に照射して光誘起効果による屈折率変化を生じさせて前記屈折率変化領域を作製することが記載されている。

【0007】

【発明が解決しようとする課題】しかしながら、これら従来技術としてのフォトニック結晶光導波路には幾つかの課題もある。まず始めに図7の線欠陥光導波路においては、光波10が導入される際に、線欠陥光導波路の断面が非常に小さく、外部光学系との光学結合を著しく困難にしている。さらに、その製造方法は未だ確立されておらず、安定に作ることは困難である。

【0008】そこで、本発明の主な課題の一つは、このような従来技術としてのフォトニック結晶光導波路の欠点を克服し、外部光学系との結合効率の良好かつ作製容易な新しいフォトニック結晶光導波路の形態を提供する

ことにある。また、それらフォトニック結晶光導波路のデバイスとしての応用方法を提案するものである。

【0009】

【課題を解決するための手段】本発明によるフォトニック結晶光導波路は、光の波長程度の大きさで、屈折率が2次元或いは3次元周期的に変調された構造体としてのフォトニック結晶において、前記フォトニック結晶をその屈折率が前記フォトニック結晶の平均的な屈折率よりも小さい材料(クラッド)で挟み込むことにより、フォトニック結晶部分をコアとするスラブ導波路型のフォトニック結晶構造を有し、前記スラブ導波路型フォトニック結晶のコア層部分の一部の厚さを他の部分よりも若干厚くすることにより屈折率ガイド効果を持たせ、このコアの層厚の厚い部分を導波路として光を導くことを特徴とするフォトニック結晶光導波路、或いはまた、上記のフォトニック結晶光導波路において、コア部分を成すフォトニック結晶層の厚さは均一のままにして、コア部分の一部にその屈折率がクラッド部分よりも大きい材料を貼り付けることにより屈折率ガイド効果を持たせ、この別の材料を貼り付けた部分を導波路として光を導くことを特徴とするフォトニック結晶光導波路、或いはまた、上記において、コアの一部に貼り付ける材料としては、レジスト特にPMMA系レジスト或いはSiO<sub>2</sub>を用いることを特徴とするフォトニック結晶光導波路である。

【0010】また、本発明によるフォトニック結晶光導波路は、上記のフォトニック結晶光導波路において、コア層を挟み込むクラッド層の内どちらか一方が空気であることを特徴とするフォトニック結晶光導波路、或いはまた、上記のフォトニック結晶光導波路において、光導波路を導波させる光波の波長がフォトニック結晶のフォトニックバンドギャップの外に有るか分散性の強いフォトニックバンドギャップの近傍を用いることを特徴とするフォトニック結晶光導波路、或いはまた、上記に記載のフォトニック結晶光導波路において、フォトニックバンド端付近の強い分散を用いることにより、光導波路を伝搬させる光波或いは光パルスの遅延動作、圧縮動作および分散補償動作を行わせることを特徴とするフォトニック結晶光導波路である。

【0011】また、本発明によるフォトニック結晶光導波路は、光学材料中に光の波長程度の大きさの孔を2次元或いは3次元周期的に開けることにより、屈折率が2次元或いは3次元周期的に変調された構造体としてのフォトニック結晶において、前記フォトニック結晶をその屈折率が前記フォトニック結晶の平均的な屈折率よりも小さい材料(クラッド)で挟み込むことにより、フォトニック結晶部分をコアとするスラブ導波路型のフォトニック結晶構造を有し、前記フォトニック結晶の一部の孔を屈折率が1よりも大きい材質で満たすことによりこの部分に光を局在させ、この別の材料で満たされた部分を導波路として光を導くことを特徴とするフォトニック結

晶光導波路、或いはまた、上記のフォトニック結晶光導波路において、孔を満たす材料としてはレジスト特にP MMA系レジストを用いることを特徴とするフォトニック結晶光導波路、或いはまた、上記のフォトニック結晶光導波路において、孔を満たす材料として、コアとしてのフォトニック結晶を構成する物質の温度係数と符号が逆の性質を有する物質を用いることにより、特性の温度変化を小さくすることを特徴とするフォトニック結晶光導波路、或いはまた、上記のフォトニック結晶光導波路において、フォトニック結晶光導波路2本を接近させることにより得られる方向性結合器において、上記課題を解決できる。

【0012】

【発明の実施の形態】本発明の上記および他の目的、特徴および利点を明確にすべく、添付した図面を参照しながら、本発明の実施の形態を以下に詳述する。

【0013】[第1の実施形態] 図1(a)~図1(c)を参照すると、本発明の第1の実施形態としてのフォトニック結晶光導波路の構造とその作製方法を示している。

【0014】最初に、2次元或いは3次元フォトニック結晶層をコアとするスラブ構造フォトニック結晶を作製す。この図1(a)に示すのは、Si基板1上にSiO<sub>2</sub>(屈折率:約1.5)2をクラッドとする2次元スラブ型フォトニック結晶で、上側クラッドは、この場合空気(屈折率:1)である。フォトニック結晶層は、例えばSi1とSiO<sub>2</sub>2を自己クロニング法で積層した構造(例えば、1997年刊のエレクトロニクスレーターの第33巻の1260頁にある、川上彰二郎著の論文“Fabrication of submicrometre 3D periodic structures composed of Si/SiO<sub>2</sub>”)のものをを用いることができる。

【0015】この場合、フォトニック結晶層の平均的な屈折率の値は2程度となる。SiO<sub>2</sub>クラッド層2およびフォトニック結晶層3の厚さは、光閉じ込めおよび外部光学回路との結合効率の観点から、共に2μm程度が好ましい。このようなスラブ型フォトニック結晶にレジスト4を塗布し(図1(a))、リソグラフィーにより導波路を形成する部分にレジストパターンを形成する。スラブ導波路において、レジストでパターンニングされた部分は他の部分よりも等価屈折率が高くなるので、この部分に光が閉じ込められることにより、この状態(図1)においても、レジストでパターンニングされた部分を導波路とするフォトニック結晶光導波路が形成されている。

【0016】導波路を定義するレジストパターンの幅は、光閉じ込めおよび外部光学回路との結合効率の観点から2μm程度が好ましい。この場合、光導波路の断面サイズは2μm×2μmとなり、従来例の線欠陥導波路に比べてかなり大きいので、外部光学系との結合も楽に

なる。このようなレジストパターンによる光閉じ込め型導波路では、レジストの光吸収が無視できないので伝搬損失が問題となるが、短い距離であれば導波路として用いることができる。

【0017】より理想的には、レジストパターンを一旦SiO<sub>2</sub>等の吸収の少ない材料に転写し、このSiO<sub>2</sub>等のパターンによる光閉じ込め効果を用いる導波路の方が好ましい。さらには、このレジストやSiO<sub>2</sub>パターンをマスクとして、図1(b)に示す様に、フォトニック結晶コア部分を加工し、導波路パターン以外の部分を、ドライエッチングによって、若干削ることにより、図1(c)のように、コアの膜厚に変化を持たせ、膜厚の厚くなっている部分に、光波を閉じ込めて、導波路とすることもできる。この場合、例えばSiO<sub>2</sub>クラッド層を2μm、フォトニック結晶層3のレジストパターン部分の幅を同じ2μmとし、ドライエッチングにより削除した厚さは1μmとしている。

【0018】この場合、従来のリッジ導波路と比べると、導波路以外の部分には、フォトニック結晶構造が存在するので、光導波路からの光波の漏れが抑制され、このフォトニック結晶光導波路は、従来のリッジ導波路に比べて、光路の急峻な曲げにも十分対応できる。また、ベースとなるフォトニック結晶のフォトニックバンドの外では、光波の伝搬は禁止されないが、フォトニックバンドの近傍は非常に分散が大きく群速度が小さいので、これらの光導波路にバンド端近傍の波長の光を伝搬させると、分散補償やパルス圧縮、遅延回路等、様々なデバイスに応用できる。なお、ここではSi基板上的Si/SiO<sub>2</sub>系材料について示したが、GaAs基板上的AlGaAs系材料や、InP基板上的InGaAsP系材料等についても同様の構造を考えることができる。

【0019】[第2の実施形態] つぎに、図2(a)~図2(c)に示すのは、本発明の第2の実施形態としてのフォトニック結晶光導波路の構造とその作製方法である。

【0020】図2(a)に示すのは、図1で用いたのと同様の2次元或いは3次元フォトニック結晶層をコアとするスラブ構造フォトニック結晶であり、図2(b)のように収束イオンビーム(FIB)加工等を用いてダブルチャンネルを形成し、図2(c)に示すようなリッジ導波路を形成する。光はダブルチャンネルに挟まれたリッジ導波路5の部分ガイドされ、この場合も光導波路として機能する。図1(c)の構造と機能的には同等であるが、この場合加工する面積が小さいことと、FIB等による加工を用いれば、リソグラフィー工程が不用になる等のメリットがある。

【0021】図3および図4は、このような2本のリッジ型フォトニック結晶光導波路5を接近させて形成することにより、方向性結合器として動作させるものである。方向性結合器としての動作は、フォトニック結晶で

10

20

30

40

50

ない従来の光学材料を用いたものと基本的には同じであるが、フォトニック結晶導波路を用いれば、導波路5内部で光の群速度を著しく小さくすることができるので、通常のリッジ型光導波路による方向性結合器に比べて著しく小さく作ることができる。

【0022】すなわち、図4において、リッジ導波路5、15が近接して2列の構成の場合、リッジ導波路15に光波6が入力することにより、直進するリッジ導波路15と、図上点線で示す隣接したリッジ導波路5に一部が導入されることにより、フォトニック結晶による方向性結合器として、主導波路のリッジ導波路15からと、その一部の光波として副導波路のリッジ導波路5からそれぞれ光波を得ることができる。この場合、リッジ導波路5、15がそれぞれ同一の導波路の場合、リッジ導波路5を主導波路として、リッジ導波路15を副導波路として機能するのは勿論である。

【0023】[第3の実施形態] 図5(b)及び図5(c)は、本発明の第3の実施形態としてのフォトニック結晶光導波路の構造である。ここで用いるフォトニック結晶基板は、例えば1のSi基板の上に2のSiO<sub>2</sub>層を2μm程度積層し、さらにその上に3のSi層を2μm程度積層したウエハを準備し、3のSi層部分に直径約0.5μm、中心間隔0.6~0.8μm程度の孔を2のSiO<sub>2</sub>層に達する深さまで正方格子状あるいは三角格子状あるいは六角格子状に開けたものである。ここで3のフォトニック結晶層としては、2次元(平面)状に周期的に規則正しく孔が開いた構造のものを示したが、一般的には光学材料中に光の波長程度の大きさの孔を2次元或いは3次元周期的に開けることにより、屈折率が2次元或いは3次元周期的に変調された或いは繰り返された構造体であればよい。このフォトニック結晶層3をその屈折率が前記フォトニック結晶層の平均的な屈折率よりも小さいクラッド材料で挟み込むことにより、フォトニック結晶部分をコアとするスラブ導波路型のフォトニック結晶構造を成している。この図の例では、下側クラッド層に相当するのは2のSiO<sub>2</sub>層であり、上側クラッド層に相当するのは図には書かれてないが、屈折率1の空気層である。

【0024】ここで、図5(b)及び図5(c)に示す様に、3のフォトニック結晶層の一部の孔を屈折率が1よりも大きい材質で満たすことにより、この部分に光を局在させ、この部分を導波路として光を導くことが可能となる。このような光導波路構造の実現方法の一例を、図6(a)および図6(b)に示す。最初にフォトニック結晶からなるコア部分全面にレジスト7を塗布し、図

6(a)に示す様に、リソグラフィーを用いて、導波路パターンを露光する。この後、現像することにより、図6(b)に示す様に、感光した部分のレジストは溶解してなくなるので、導波路パターンとしてレジストが残る。このレジストパターンを導波路として用いることができる。

【0025】勿論、光導波路として用いるレジストは、ポリメタクリル酸メチル(PMMA)系のレジストのように、長波長帯で吸収損失の小さいものが望ましい。また、レジスト以外の材料でも、ポリイミドやBCBのように吸収損失の小さい材料があれば、レジストの代わりとして、光導波路部分に用いることができる。このようなタイプの光導波路構造では、図5(a)に示す様に、孔を埋め込む材料の温度係数を、母体のフォトニック結晶材料の温度係数と、符号が逆のものをを用いることにより、温度変化を打ち消し、温度無依存化(アサーマル化)を図ることもできる。

【0026】なお、本発明は上記各実施形態に限定されず、本発明の技術思想の範囲内において、各実施形態は適宜変更され得ることは明らかである。

【0027】

【発明の効果】以上説明したように、本発明によれば、外部回路との光学結合の良好な微小光回路を実現できる。すなわち、外部光学系との結合効率を良好としかつ作製容易な新しいフォトニック結晶光導波路の形態を提供することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の第1の実施形態を示す構造図である。

【図2】本発明の第2の実施形態を示す構造図である。

【図3】本発明の第1および第2の実施形態の構造のデバイス応用の一例を示す図である。

【図4】本発明の第1および第2の実施形態の構造のデバイス応用の一例を示す図である。

【図5】本発明の第3の実施形態を示す構造図である。

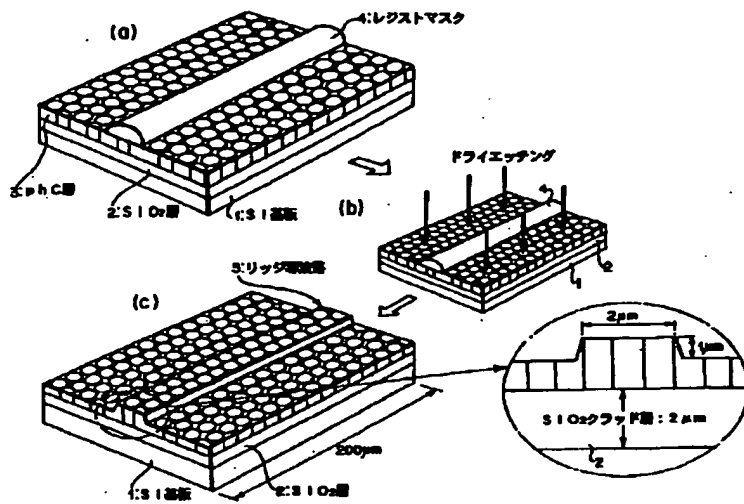
【図6】本発明の第3の実施形態を示す構造図である。

【図7】従来例としての線欠陥導波路を示す図である。

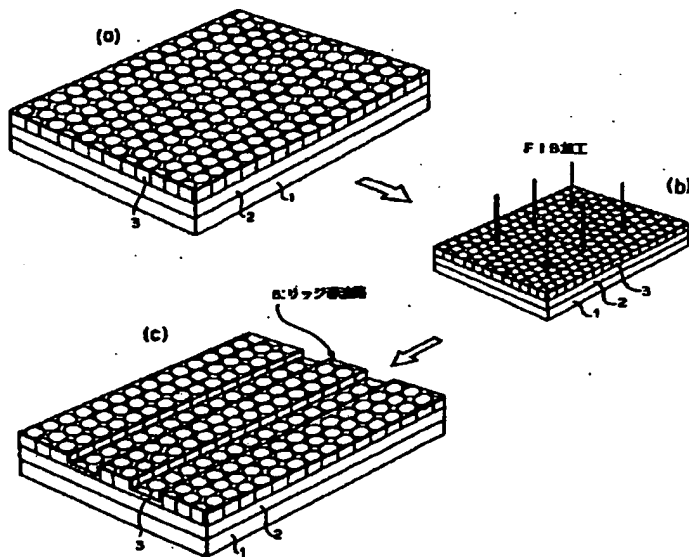
【符号の説明】

- 1 シリコン基板
- 2 酸化シリコン層
- 3 フォトクラッド層
- 4 レジストマスク
- 5 リッジ導波路
- 6 光波
- 7 レジスト
- 8 フォトマスク

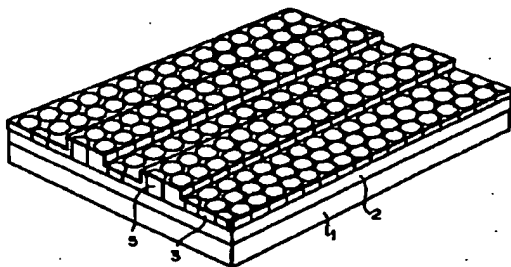
【図1】



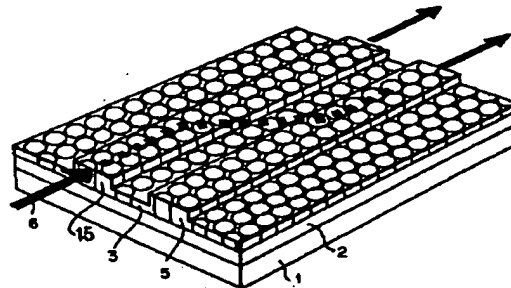
【図2】



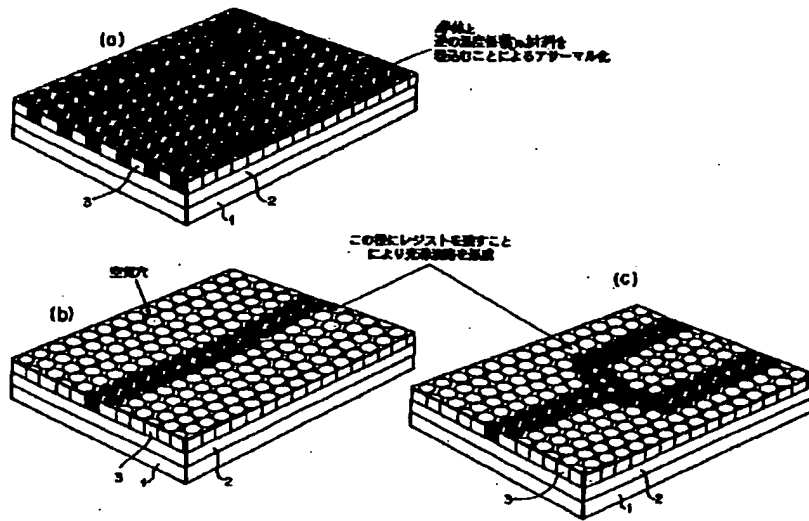
【図3】



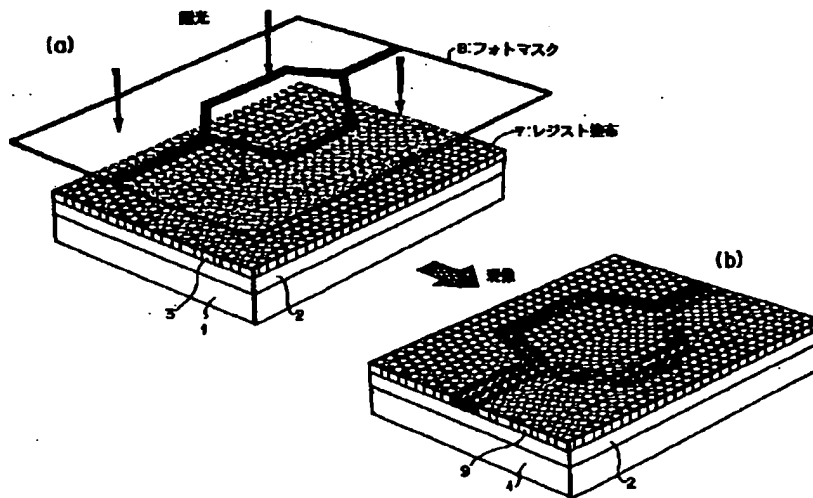
【図4】



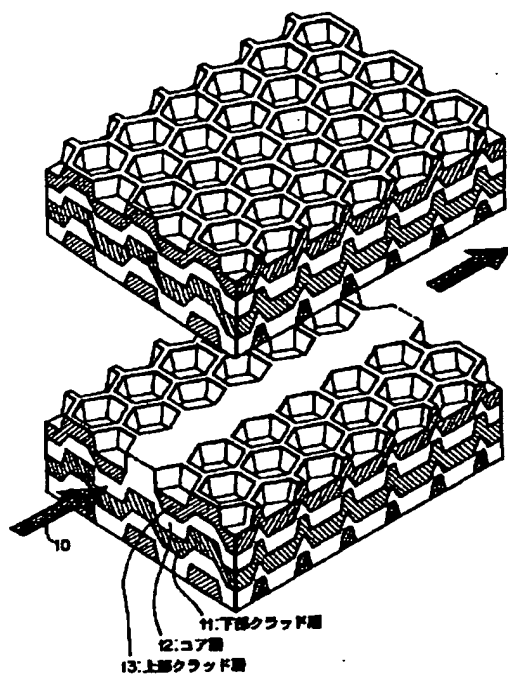
【図5】



【図6】



【図7】





**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning  
Operations and is not part of the Official Record**

**BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ BLACK BORDERS
- ☐ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- ☐ FADED TEXT OR DRAWING
- ☒ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING
- ☐ SKEWED/SLANTED IMAGES
- ☐ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS
- ☐ GRAY SCALE DOCUMENTS
- ☐ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT
- ☐ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY
- ☐ OTHER: \_\_\_\_\_

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.**